

SiC Malzemelerin Gri Dökme Demirde Aşılaiıcı Olarak Kullanımı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Merve KOPARAN^{1*}, Batuhan AKKAYA¹, Tarık CEBECİ¹, Veysel DURAK¹, Ferhat GÜL²

¹Erkunt Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/09/2025
Düzeltilme: 30/10/2025
Kabul: 16/11/2025

Anahtar Kelimeler

Gri Dökme Demir
SiC
Mikroyapı
Termal Analiz
Sertlik

Article Info

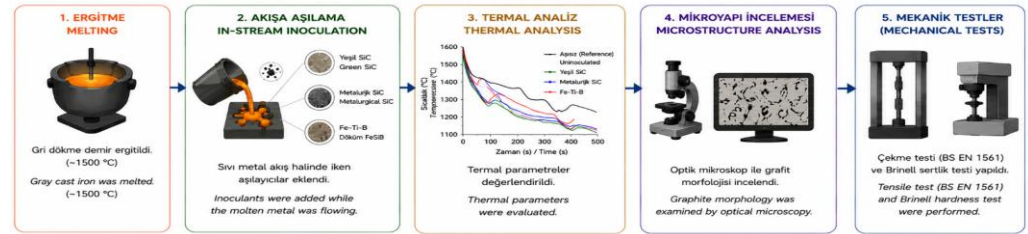
Research article
Received: 17/09/2025
Revision: 30/10/2025
Accepted: 16/11/2025

Keywords

Gray Cast Iron
SiC
Microstructure
Thermal Analysis
Hardness

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Gri dökme demir; yeşil SiC, metalürjik SiC ve FeSi-Ba aşılaiıcıları kullanılarak akış içi aşılama tekniğiyle aşılammıştır. Termal analiz, mikroyapı ve mekanik testler sonucunda aşılama işleminin A tipi grafit oluşumunu teşvik ettiği, mikroyapı homojenliğini artırdığı, çekme özelliklerini iyileştirdiği ve sertliği sınırlı düzeyde azalttığı belirlenmiştir. / Gray cast iron was inoculated by the in-stream inoculation technique using green SiC, metallurgical SiC, and FeSi-Ba inoculants. Thermal analysis, microstructure and mechanical tests showed that inoculation promoted A-type graphite formation, improved microstructural homogeneity and increased tensile properties, while slightly reducing hardness.



Şekil A: Çalışma Özeti / Figure A: Study Summary

Önemli noktalar (Highlights)

- Gri dökme demirde yeşil SiC, metalürjik SiC ve Ba-FeSi aşılaiıcıları karşılaştırılmıştır. / Green SiC, metallurgical SiC and Ba-FeSi inoculants were comparatively investigated.
- Aşılama işlemi A tipi grafit oluşumunu artırarak mikroyapı homojenliğini geliştirmiştir. / Inoculation promoted A-type graphite formation and improved microstructural homogeneity.
- Yeşil SiC, geleneksel aşılaiıcılara alternatif olabilecek başarılı sonuçlar vermiştir. / Green SiC showed promising performance as an alternative inoculant.
- Çekme ve akma dayanımları yaklaşık %10 artarken sertlikte sınırlı azalma meydana gelmiştir. / Tensile and yield strengths increased by approximately 10%, while hardness slightly decreased.
- Termal analiz sonuçları ile mikroyapı değişimleri birlikte değerlendirilmiştir. / Thermal analysis results were correlated with microstructural evolution.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, akışa aşılama yöntemiyle uygulanan yeşil SiC, metalürjik SiC ve Ba-FeSi aşılaiıcılarının gri dökme demirin termal davranışı, mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. / The aim of this study is to investigate the effects of green SiC, metallurgical SiC and Ba-FeSi inoculants applied by in-stream inoculation on the thermal behavior, microstructure and mechanical properties of gray cast iron.

Özgünlük (Originality): Önceki çalışmaların aksine, yüksek saflıkta yeşil SiC doğrudan akışlı aşılama yöntemiyle uygulanmış ve aynı döküm koşulları altında geleneksel aşılaiıcılarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. / Unlike previous studies, high-purity green SiC was applied using the direct- in-stream inoculation method and evaluated in comparison with conventional inoculants under the same casting conditions.

Bulgular (Results): Aşılama işlemi A tipi grafit oluşumunu artırmış, mikroyapıyı daha homojen hale getirmiş, ferrit oranındaki artışa bağlı olarak çekme ve akma dayanımlarını yaklaşık %10 artırırken sertlikte azalmaya neden olmuştur. / Inoculation promoted A-type graphite formation, improved structural homogeneity and increased tensile and yield strengths by approximately 10%, while reducing hardness due to increased ferrite content.

Sonuç (Conclusion): Yeşil SiC, gri dökme demirde akışa aşılama yöntemiyle uygulandığında grafit morfolojisini ve mekanik özellikleri geliştiren, geleneksel aşılaiıcılara alternatif olabilecek etkili bir aşılaiıcıdır. / Green SiC is a promising alternative inoculant for gray cast iron and provides significant improvements in graphite morphology and mechanical properties when applied by in-stream inoculation.



SiC Malzemelerin Gri Dökme Demirde Aşılaiıcı Olarak Kullanımı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Merve KOPARAN^{1*}, Batuhan AKKAYA¹, Tarık CEBECİ¹, Veysel DURAK¹, Ferhat GÜL²

¹Erkunt Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/09/2025
Düzeltilme: 30/10/2025
Kabul: 16/11/2025

Anahtar Kelimeler

Gri Dökme Demir
SiC
Mikroyapı
Termal Analiz
Sertlik

Öz

Gri dökme demirler, üstün dökülebilirlik, yüksek ısı iletkenliği ve titreşim söndürme kabiliyeti sayesinde otomotiv ve makine imalat sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak lamel grafit yapısı nedeniyle çelik ve küresel grafitli dökme demirlere göre daha düşük mekanik özellikler sergilemektedir. Bu nedenle, grafit morfolojisini iyileştirmek amacıyla aşılama işlemi üzerine birçok deneysel çalışma yürütülmektedir. Bu çalışmada, farklı aşılaiıcıların gri dökme demirin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, sıvı metalin kalıba dökümü sırasında akışa aşılama yöntemi uygulanmış; yüksek saflıkta yeşil Silisyum Karbür (SiC), metalürjik SiC ve baryum içeren FeSi aşılaiıcıları kullanılmıştır. Aşısız ve aşılama numuneleri termal analiz, optik mikroyapı incelemeleri ve mekanik testlerle değerlendirilmiştir. Termal analiz sonuçları, ötektik sıcaklık, geri ısınma miktarı ve grafitleşme eğiliminin kullanılan aşılaiıcıya bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Mikroyapı incelemelerinde, aşılama uygulanmayan numunelerde D ve E tipi grafit yapıları baskın iken, aşılama numunelerinde A tipi grafit oluşumu ve daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Mekanik testler sonucunda, artan ferrit oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde azalma, buna karşılık çekme ve akma dayanımlarında yaklaşık %10 oranında artış belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, akışa aşılama yönteminin grafit morfolojisini iyileştirerek gri dökme demirin mikroyapısal homojenliğini ve mekanik performansını önemli ölçüde geliştirdiğini, özellikle yeşil SiC'nin geleneksel aşılaiıcılara alternatif olabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

The Use of SiC Materials as Inoculants in Gray Cast Iron and Their Effects on Mechanical Properties

Article Info

Research article
Received: 17/09/2025
Revision: 30/10/2025
Accepted: 16/11/2025

Keywords

Gray Cast Iron
SiC
Microstructure
Thermal Analysis
Hardness

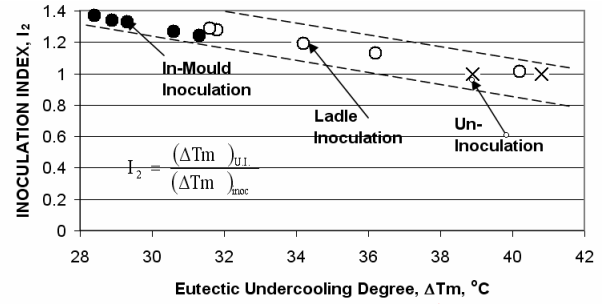
Abstract

Gray cast iron is widely used in the automotive and machinery industries due to its excellent castability, high thermal conductivity, and superior vibration damping capacity. However, because of its lamellar graphite structure, it exhibits lower mechanical properties than steel and spheroidal graphite cast iron. Therefore, numerous experimental studies have focused on inoculation treatments to improve graphite morphology and mechanical performance. In this study, the effects of different inoculants on the microstructural and mechanical properties of gray cast iron were investigated. In-stream inoculation was applied during mold filling using high-purity green silicon carbide (SiC), metallurgical SiC, and barium-containing FeSi inoculants. Uninoculated and inoculated specimens were evaluated by thermal analysis, optical microstructural examination, and mechanical testing. The thermal analysis results showed that the eutectic temperature, recalescence, and graphitization tendency varied depending on the inoculant used. Microstructural observations revealed that D- and E-type graphite predominated in the uninoculated samples, whereas inoculated samples exhibited A-type graphite and a more homogeneous microstructure. Mechanical test results indicated a reduction in hardness due to the increased ferrite content, while the tensile and yield strengths increased by approximately 10%. The findings demonstrate that the in-stream inoculation process significantly improves graphite morphology, microstructural homogeneity, and mechanical performance of gray cast iron. Furthermore, high-purity green SiC exhibited promising potential as an alternative inoculant to conventional inoculation materials.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

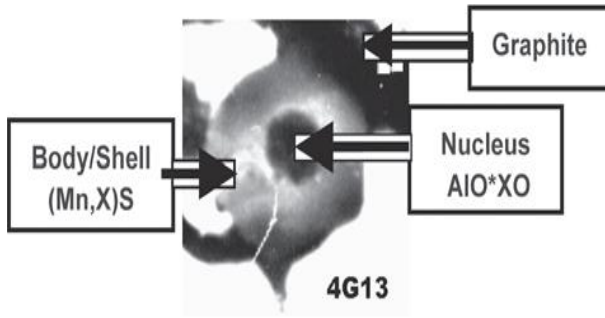
Grafitin lamel formda çökeldiği gri dökme demirlerde, mukavemet, süneklik, ısı iletkenlik, titreşim söndürme gibi birçok özellik bu grafit formu tarafından belirlenmekte, malzeme kırık yüzey görüntüsünün gri olmasına neden olmaktadır [1,2]. Çelik matriste gömülmüş şekilde bulunan grafit lamelleri, çelik matrise göre özelliklerde önemli azalma meydana getirmekte, kesit kalınlığı ve soğuma hızına bağlı olarak farklı özellikler elde edilmektedir [3,4]. Kalın kesitli döküm parçalarda daha iri grafit lamelleri gözlenirken, kesitin incilmesi ile kısa ve ince grafit lamelleri oluşmaktadır [4]. Basma yükleri altında bu grafit lamelleri yük taşıma kapasitesine sahip iken, çekme gerilmesi durumunda zayıf arayüzeye ve dolayısıyla düşük mukavemete neden olmaktadır [5]. Mühendislik ve döküm özellikleri bakımından değerlendirildiğinde, nispeten iyi akıcılık ve dökülebilirlik, basma mukavemeti, yüksek titreşim söndürme özelliği, iyi işlenebilirlik, ısıl şoklara karşı yüksek dayanım, aşınma ve korozyon direnci özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [3,6]. Gri dökme demir, %3,0-3,5 oranında karbon içeriğiyle tüm dökme demir türleri arasında en yaygın kullanılan malzemedir. Sahip olduğu bu üstün özellikler nedeniyle, oldukça geniş bir endüstriyel uygulama alanı bulmuştur. Gri dökme demir otomotiv endüstrisinde fren disklerinde [5,7], motor bloklarında [2,5,8], vana sistemlerinde [9] kullanılmaktadır. İyi korozyon ve aşınma direnci, yüksek işlenebilirlik ve iyi dökülebilirlik özellikleri [10] ile birlikte gri dökme demirin çeliğe göre ekonomik oluşu endüstriyel uygulamalarda kullanılmasına olanak tanımaktadır [6]. Gri dökme demirin mekanik ve mikroyapısal özellikleri, ergitme öncesinde demir-silisyum esaslı alaşımların ilavesiyle yapılan ve aşılama olarak bilinen bir sıvı işlemdir. Bu işlem, katılaşma sırasında ötektik hücre sayısını artırarak aşırı soğumayı engellemeyi ve böylece aşırı soğuma sonucu oluşabilecek grafit yapıları ile matris içinde karbür oluşumunu önlemeyi sağlamakta, malzemenin işlenebilirliğini artırmada da etkili olmaktadır [11, 12, 13]. Ferrosilisyumda (FeSi) kalsiyum (Ca) ve alüminyum (Al) ilavesi ile başlayan ve Sr (Stronsiyum), Ba (Baryum), Zr (Zirkonyum), Ce (Seryum) elementlerinin ilavesi ile süregelen gelişme, aşı maliyetini azaltma ve sönümün önlenmesi yönünde çabalar ile devam etmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi aşılamanın uygulandığı

yönteme göre aşılama verimliliği değişim göstermektedir [14].



Şekil 1. Aşılama metoduna göre ötektik alt soğuma derecesi ile aşılama indeksinin değişimi [14] (Variation of eutectic undercooling and inoculation index according to the inoculation method [14])

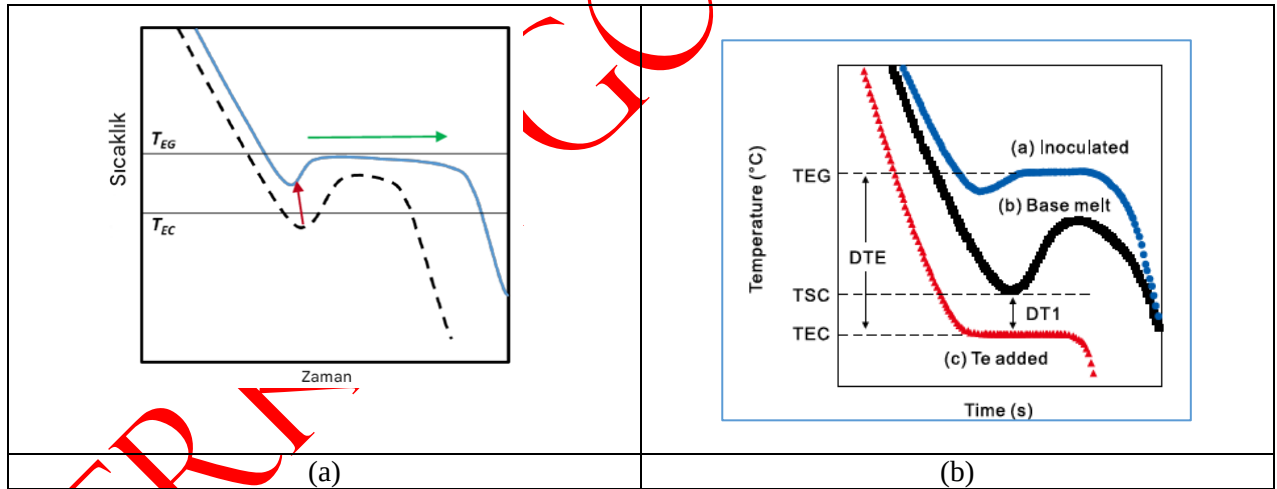
Riposan vd. [15] tarafından tarama elektron mikroskobu kullanılarak mikro inklüzyon üzerine yapılan çalışmalarda, (Mn,X)S bileşiklerinin, (X = Fe (Demir), Al (Alüminyum), O (Oksijen), Si (Silisyum), Ca (Kalsiyum), Sr (Stronsiyum), Ti (Titanyum) vb.), grafit çekirdeklenmesi için ana bölgeler olduğu, 1-8 μm boyuta ve yaklaşık 0,1-2,7 μm uzunluğunda net bir oksit çekirdeğe sahip olduğu belirlenmiştir. Kullanılan aşılama yöntemleri bu bileşiklerin morfolojileri üzerinde etkili olduğu, Ca içeren aşılama yönteminde oval, Sr içeren aşılama yönteminde düzenli çokgen ve yüksek saflıktaki FeSi (Ferro silisyum) aşılama yönteminde ise düzensiz çok şekilli (Mn,X)S bileşiklerinin oluştuğu ve aynı soğuma hızının artması ile boyutlarının da küçüldüğü belirtilmektedir. Aşılama ilavesi ile daha düşük Mn/S oranına sahip olup, bunlar grafit çekirdeklenmesi için daha uyumlu olmaktadır. Sonuç olarak çekirdeklenmenin, 0,2 μm 'den küçük oksit çekirdekleri, bu mikro inklüzyonların üzerinde genellikle 5 μm 'den küçük karmaşık MnS bileşikler, bunun üzerine grafit çekirdeklenmesi gerçekleştiği belirlenmiştir. Aşılama durumunda bu mikro bileşikler (Mn, X)S, daha karmaşık hale gelmekte, Mn/S oranı düşmekte ve grafit çekirdeklenmesi için daha uyumlu hale gelmektedir. Ca, Ba ve Sr içeren FeSi aşılama yöntemlerinin yanı sıra, Al ve/veya Zr içeren oksit oluşturan elementlerle yapılan aşılama işlemlerinin de grafit çekirdeklenmesi üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmektedir [15, 16]. Benzer bileşiklerin başka çalışmaların sonuçlarında da gözlemlendiği belirtilmektedir [17, 18]. Şekil 2'de gri dökme demirde grafitin çekirdeklenmesi için meydana gelen üç aşamalı model [18] ve model üzerinde etkili olan elementler gösterilmektedir [19].



Şekil 2. Gri dökme demirde grafitin çekirdeklenmesinde üç aşamalı model [18], ve bu model üzerinde etkili olan elementler [19] (A three-stage model for graphite nucleation in gray cast iron [18], and the elements influencing this model [19])

Daha önce yapılan çalışmalarda, SiC ve Ba gibi aşılama elementlerinin bulunduğu aşılama elementleri, grafit lamel tipi ve uzunluğunu doğrudan etkileyerek çekme ve akma dayanımı ile sertlik değerlerinde değişikliklere yol açtığını göstermektedir [12-20]. Bu bağlamda, aşılama işlemi, gri dökme demirin mekanik özelliklerini iyileştirmekte [12], ergiyik demirin kimyasal içeriği, aşılama ve soğuma hızı, malzemenin mekanik özelliklerinde belirleyici rol oynamakta,

lamel grafitlerin, boyutu, miktarı, morfolojisine etki etmektedir [21]. Aşılama işlemi gri dökme demire ergiyik halde yapılarak gerek matrisin ve gerekse grafit yapısının önemli şekilde değişimini mümkün kılmaktadır. Ergiyik demirdeki alt soğuma miktarı aşılama işlemiyle düşürülerek, yapıda muhtemel karbür oluşumunu azaltmak veya yok etmekte, yapının incelmelerini, kalın ve ince kesitlerdeki farkların azaltarak, yapı ve özelliklerde homojenliği temin etmektedir. Bununla birlikte aşılama işlemi grafit yapraklarının oluşumunu düzenleyerek, ötektik grafit morfolojisi, dağılımını ve ayrıca yapıdaki perlit ferrit oranlarının kontrol edilmesinde önemli etkiye sahiptir [3]. Edalatı'nın çalışmasında ise, SiC aşılama ilavesinin bir diğer aşılama ilavesi olan FeSi ilavesine kıyasla; daha yüksek likidüs ve ötektik sıcaklıklar, daha fazla A tipi grafit içeriği, artmış ötektik hücre sayısı ve A tipi grafitin daha homojen bir dağılımını sağlandığı bildirilmiştir [22]. Şekil 3a'da, aşılama işleminin ötektik alt soğuma ve yeniden ısınma miktarını azalttığı görülmektedir [23]. Şekil 3b'de ise gri dökme demirde bileşim analizi için yapılan Te içerikli Quick-Cup kullanımında sırasında karbür oluşumu sonucu soğuma eğrisindeki değişim görülmektedir [24].



Şekil 3. Aşılamanın soğuma eğrisi üzerindeki etkisi [13], Te ilavesi ile soğuma eğrisinde değişim [24] (Effect of inoculation on the cooling curve [13], change in the cooling curve with Te addition [24])

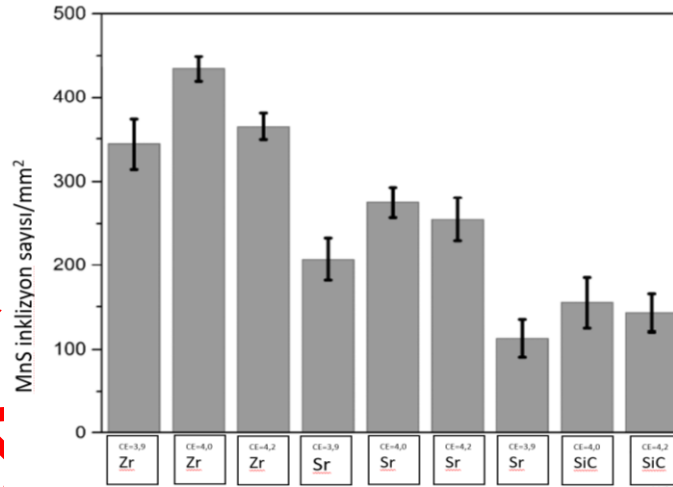
Aşılama işlemi, ergiyik metale mikropartiküller ekleyerek grafit gibi fazlar için çekirdeklenme bölgeleri oluşturmayı ve bu bölgelerin sayısını artırarak oluşacak fazın boyut ve şeklini kontrol etmeyi amaçlar. Gri dökme demirde Al (Alüminyum), Sr (Stronsiyum), Zr (Zirkonyum) ve az miktarda Ca (Kalsiyum) gibi elementleri içeren Fe-Si aşılama malzemeleri kullanılmaktadır. Oksijen ve kükürt ile reaksiyona giren bu elementler grafit çekirdeklenmesini kolaylaştıran oksit ve

sülfür bileşiklerini oluşturmakta, aynı zamanda Mn (Mangan), MnS oluşturarak oluşuma katkı sağlamaktadır [25]. Aşılama işleminde, aşının uygun hızda çözünmesi ve oksitlenmemesi istenmektedir. Kullanılacak aşının tane boyutu; parça geometrisine, ergiyik metalin sıcaklığına ve miktarına göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca, aşılama sonu olmaması için zamanlamaya dikkat edilmelidir. [26]. Aşılamanın etkin bir şekilde gerçekleşmesi, küçük alt soğumalar ile

grafitin çekirdeklenmesini sağlamaktır. Bunun için aşılamanın mümkün olduğu kadar geç uygulanması gerekmektedir [16]. Aşı malzemelerinin zamanla sönüme uğradığı ve etkisini yitirdiği bilinmektedir [19]. Ayrıca kalın kesitlerde uzayan katılaşma zamanından dolayı sönüm durumunun gerçekleşebileceği ifade edilmektedir. [27, 28]. Kalın kesitli gri ve küresel grafitli dökme demir parçalarda sönüm açısından avantajlı olan baryum içerikli aşılar ile ön şartlandırma yapılması önerilmektedir. Baryum, kalsiyum gibi güçlü deoksider olup, tüm sıcaklıklarda kalsiyumdan daha etkin aşılama olduğu belirtilmekte, Ba-Ca kombinasyonu ile aşılamanın, geniş sıcaklık aralığında etkili olduğu ve sönüm süresini önemli derecede uzattığı belirtilmektedir [29].

Wang vd. tarafından yapılan çalışmada farklı CE (Karbon Eşdeğer) değerlerine (S1:3,9, S2:4 ve S3:4,2) sahip malzemelerde Zr(Z), Sr(S) ve C(SiC) içerikli aşılama kullanımı ile mm²'deki MnS sayısındaki değişim Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada Zr içerikli FeSi ile aşılama, en yüksek MnS inklüzyon sayısını verirken, bu değer SiC içerikli

aşılama da en düşük değerdedir. Zr(Z) ve Sr(S) içerikli aşılar kullanıldığında MnS parçacıklarının çekirdeğinde ZrO₂ veya SrO gibi oksitler tespit edilirken, Sr içerikli aşının, Zr içerikli aşıya nazaran daha yüksek ötektik tane sayısına ve dolayısıyla daha yüksek mukavemet ve sertliğe neden olduğu belirlenmiştir. SiC aşı kullanımında ise; MnS çekirdeğinde böyle bir inklüzyon gözlenmemiş ve grafit merkezlerinde büyük boyutlu, kümelenmiş MnS parçacıkları belirlenmiştir. SiC ilavesinin A-tipi grafiti teşvik ettiği, birincil östenit için yeterli çekirdeklenme bölgeleri sağlamadığı tespit edilirken, Zr içerikli aşılama kullanılarak, ötektik kolonilerin büyümesine imkân sağlayarak, birincil östenit dendritlerinin gelişimini sınırladığı ve kısa grafit lamelleri oluşturduğu gözlenmiştir. Bu mikroyapısal şartlarda Sr içerikli aşı en yüksek, Zr içerikli aşı orta ve SiC aşı ise en düşük mukavemet sağlamıştır [12]. Dorula vd. tarafından düşük ve yüksek kükürlü malzemede yapılan aşılama çalışmalarında, birincil östenit tane boyutlarının ve sayılarının mukavemet için kritik öneme sahip olduğunu ve artan primer östenit tane sayısı ile mukavemetin artacağı ifade edilmektedir [30]



Şekil 4. Sıvının karbon eşdeğerliği ve aşı türüne bağlı olarak mm²'de oluşan MnS sayısı [12] (Number of MnS inclusions formed per mm² as a function of the melt's carbon equivalent and the type of inoculant [12])

Ana-Marija vd. tarafından yapılan çalışmada, özellikle yüksek oranda çelik hurda içeren gri dökme demirlerde SiC ile yapılan ön şartlandırmanın çekirdeklenme potansiyelini artırdığı belirtilmiştir. Ancak ince kesitlerde, yüksek soğuma hızlarına bağlı olarak oluşan aşırı alt soğuma sonucunda D ve E tipi grafit yapılarının geliştiği, ayrıca kenar bölgelerde artan soğuma hızıyla birlikte karbür oluşumunun meydana gelebileceği ifade edilmektedir. Aşılama işleminin

ise sıvı metalin çekirdeklenme potansiyelini artırarak uygun kesit kalınlıklarında mikroyapıyı olumlu yönde etkilediği, karbür oluşumunu azalttığı veya engellediği ve B, D, E tipi grafitleri baskılayarak A tipi grafit oluşumunu teşvik ettiği vurgulanmaktadır [3].

Birçok çalışmada SiC malzemenin ön şartlandırıcı şeklinde aşılama olarak performansının incelenmesi gri dökme demirde [31, 32] ve küresel

grafitli dökme demirde [33] yapılan akademik çalışmalar söz konusu olmuş, ancak döküm sırasındaki potaya, kalıba veya akışa aşılama yöntemi üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır [12].

Bu çalışmada, diğer aşılar ve metalürjik SiC yanında, yüksek saflıkta yeşil SiC malzemenin en verimli aşılama yöntemlerinden biri olan akışa aşılama işlemi uygulanmış olup, bu işlemin gri dökme demirin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

2.MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1.Döküm ve Aşılama İşlemi (Casting and Inoculation Process)

Ergitme işlemi orta frekanslı indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiş olup, döküm işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada bileşimi Tablo

1’de verilen 1 no’lu gri dökme demir malzeme kullanılmış ve sıvı metal FeSi (Ferrosilisyum) ile aşılanaarak kum kalıplara dökülmüştür. Bu aşamada döküm sıcaklığındaki değişime bağlı olarak meydana gelen grafit yapısı incelenmiştir. İkinci aşamada Tablo 1’de verilen 2 no’lu sıvı alaşım ile 4 adet farklı numune hazırlanmıştır. Bu aşamada aşılama işlemi uygulanmadan, yüksek saflıkta yeşil SiC (%99,5), metalürjik SiC ve Ba içerikli FeSi malzemeler kullanılarak akışa aşılama işlemi uygulanmıştır.

Tablo 1. Ana malzemenin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of the base material)

Alaşı m No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	Sn	Fe
1	3,52	1,70	0,260	0,045	0,065	0,150	0,025	0,001	0,409	0,002	0,019	Kalan
2	3,60	1,63	0,262	0,039	0,0575	0,106	0,030	0,002	0,491	0,008	0,014	Kalan

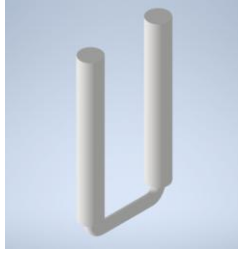
Tablo 2. Deneylerde kullanılan aşı malzemeleri ve kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) (Vaccine materials and chemical composition (wt%) used in the experiments)

No	Aşı	SiC	Fe ₂ O ₃	F.C.	Al ₂ O ₃	Fe	C	Si	Ca	Al	Ba
1	Yok	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Yeşil SiC	99,5	0,12	0,16							
3	Metalürjik SiC	88,0 – 92,0	-	-	3,0	0,5	1,5	-	-	-	-
4	Ba-FeSi	-	-	-	-	-	-	70,0-77,0	0,8-1,5	0,8-1,5	0,8-1,5

Döküm işleminde, 1500 °C sıcaklıktaki sıvı alaşım, 25 mm çapa sahip ve Şekil 5’te gösterilen iki çubuktan oluşan U şeklindeki numune tasarımına uygun olarak reçineli kalıplara dökülmüştür. Kalıplardan ilki, herhangi bir aşılama işlemi uygulanmadan dökülürken; 2., 3. ve 4. kalıplara

sırasıyla %0,4 oranında yeşil SiC, metalürjik SiC ve baryum içeren aşılama malzemeleri, Tablo 2-4’te belirtilen bileşimlere uygun şekilde, akışa aşılama yöntemiyle sıvı metal içerisine eklenmiştir. Aşılama işlemi öncesinde ve sonrasında sıvı alaşımdan numuneler alınarak kimyasal bileşim analizi yapılmış; bu

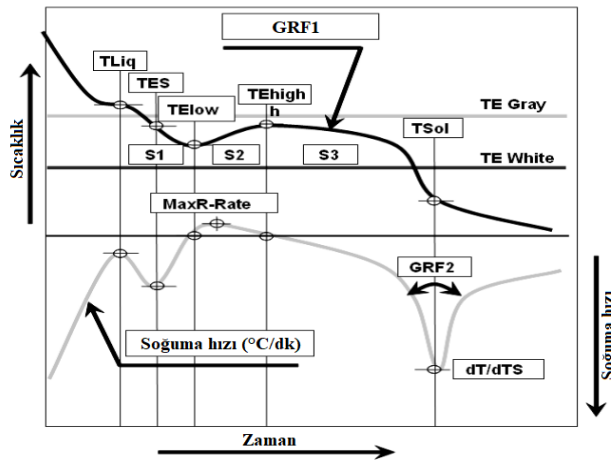
numuneler para boyutundaki metal kalıplara dökülerek spektrometre cihazı ile test edilmiştir.



Şekil 5. U şeklindeki reçineli kalıp içerisine dökülen numunenin 3 boyutlu resmi (3D image of the sample poured into a U-shaped resin mold)

2.2. Termal Analiz (Thermal Analysis)

Malzemenin katılaşma davranışını belirlemek amacıyla özel olarak hazırlanan sıvı alaşım kullanılarak, ATAS marka cihazda termal analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Termal analiz, döküm öncesinde sıvı alaşımın kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, termal analizde bazı temel parametrelerin belirlenmesi ve optimum şartların ortaya konulması açısından büyük önem taşımaktadır. Analizde öncelikli olarak ele alınan kavram, metal kalitesi ile MQ ifade edilir. Şekil 6'da verilen grafikte, sıvı sıcaklığı (TL), ötektik katılaşma sıcaklığı (TES), geri yükselme (R), grafitleşme faktörleri (GRF1 ve GRF2), katılaşma sıcaklığı (TS) ve soğuma hızı ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) gibi önemli termal parametreler de değerlendirilmektedir. Yapılan analiz sonucunda, malzemenin döküm öncesinde göstereceği katılaşma karakteri net bir şekilde ortaya konulabilmektedir.



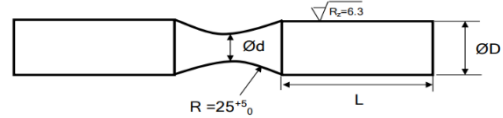
Şekil 6. Termal analiz sonucu çizilen soğuma eğrisi ve bazı değerlerin eğri üzerinde gösterimi [34] (Cooling curve plotted from thermal analysis results and the indication of certain values on the curve [34])

2.3. Mikroyapısal Analiz (Microstructural Analysis)

Döküm malzemelerin grafit ve matris yapılarını incelemek amacıyla mikroyapı analizleri optik mikroskop altında gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için numunelerin kesimi, ATM marka Brillant 250 model kesme cihazıyla yapılmıştır. Metalografik hazırlık sürecinde sıcak montaj işlemi, ATM Opal 460 model cihaz kullanılarak uygulanmıştır. Numunelerin yüzey hazırlığında ise ATM Safire 350 model cihaz tercih edilmiş; sırasıyla 220, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 Mesh boyutlarında Al_2O_3 (Alüminyum Oksit) zımparalar ile zımparalama yapılmış, ardından $6\text{ }\mu\text{m}$, $3\text{ }\mu\text{m}$ ve $1\text{ }\mu\text{m}$ elmas pastalarla polisaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde grafit yapısı dağlama işlemi uygulanmadan gözlemlenirken, matris yapısının analizi %2'lik nital ile dağlama sonrası yapılmıştır.

2.4. Sertlik ve Çekme Testi (Hardness and Tensile Test)

Hazırlanan U tipi döküm numunelerden, mekanik testler için iki farklı boyutta numune elde edilmiştir: Sertlik testleri için 20 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde numuneler; Şekil 7'de verilen BS EN 1561 standardına uygun çekme testleri için ise 20 mm çapında ve 37 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 7. BS EN 1561 standardına uygun çekme numunesi (Tensile test specimen in accordance with the BS EN 1561 standard)

Sertlik testi öncesi yüzey hazırlığı, ATM marka Safire 350 model cihaz ve 220, 400, 600, 800 zımparalar kullanılarak tamamlanmıştır. Sertlik ölçümü için ise BMS OBPC (Türkiye) marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numunelere 10 mm çelik uçlu bilye ile 3000 kg yük altında Brinell Sertlik testi uygulanmış ve 3 farklı noktadan elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması alınarak sonuçlar belirlenmiştir.

2.5. Simülasyon Denemesi (Simulation Trial)

Deneyisel çalışmaların yanı sıra, GG25 (EN-GJL-250) dökme demirin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemek üzere MAGMASOFT döküm simülasyon yazılımı kullanılarak

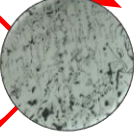
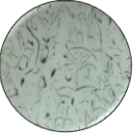
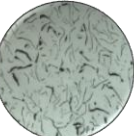
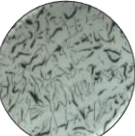
simülasyon çalışmalarına da başvurulmuştur. Bu çalışmalar, döküm sürecinde etkisi incelenen soğuma hızı, katılaşma davranışı, lamel aralığı, ötektik hücre boyutu gibi parametrelerin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Simülasyon sırasında, döküm geometrisi, kalıp malzemesi, döküm sıcaklığı, soğutma koşulları ve kimyasal kompozisyon gibi etmenler, deneysel çalışma ile tutarlı olacak şekilde tanımlanmıştır.

3.BULGULAR (RESULTS)

3.1. Aşılama ve Döküm Sıcaklığına Bağlı Olarak Mikroyapısal İnceleme (Microstructural Investigation Depending on Inoculation and Pouring Temperature)

Öte yandan döküm sıcaklığının aşılama üzerinde etkisinin gösterildiği Şekil 8’de sunulan soğuma eğrisi ise, aşılamanın döküm sıcaklığına bağlı olarak grafit morfolojisinde meydana gelen değişimleri mikroyapı görüntüleri ile ortaya koymaktadır. Düşük döküm sıcaklığında (1390°C) elde edilen mikroyapılarda, grafit oluşumunun düzensiz, kalın ve heterojen bir yapıda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, aşılama etkisinin bu sıcaklık aralığında yetersiz kaldığını göstermektedir. Fourlakidis ve arkadaşları

tarafından farklı sıcaklıklarda yapılan çalışmalarda MnS ve Mn(X)S parçacıklarının, beklenenden daha yüksek sıcaklıklarda oluştuğunu, yüksek karbon içeriğinin bu sayıyı arttırdığı belirlenmiştir. 0,8 µm’dan küçük MnS and Mn(X)S parçacıklarının sayısı, düşük döküm sıcaklığında artmasına rağmen, kalın kesit veya yüksek döküm sıcaklığı gibi düşük soğuma hızlarında 0,8 µm’dan büyük MnS and Mn(X)S parçacıklarının sayısının arttığını bunun da grafit çekirdeklenmesi için etkin olduğu ifade edilmektedir [35]. Sıcaklık arttıkça, özellikle 1400–1450 °C aralığında, grafit yapılarının daha ince, düzgün ve homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sıcaklık aralığı, aşılama etkisinin optimum düzeyde gerçekleştiği bölge olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, 1530 °C gibi yüksek döküm sıcaklıklarında grafit yapılarında düzensizliklerin ve morfolojik bozulmaların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda ferrosilisyum, stronsiyum veya nadir toprak elementleri gibi aşılama ilavelerinin etkisinin azaldığını veya tamamen kaybolduğunu göstermektedir [36,37]. Elde edilen bulgular, grafit morfolojisinin kontrolü açısından aşılamanın sadece tipi değil, uygulandığı sıcaklık aralığının da kritik bir parametre olduğunu doğrulamaktadır [38,39]

Mikroyapı Özellikleri				
	D ve E grafit	İnce ve kısa lameller	Orta kalınlık ve uzunluğa sahip lameller	Uzun ve kalın lameller
Döküm Sıcaklığı	1530°C	1430°C	1405°C	1390°C

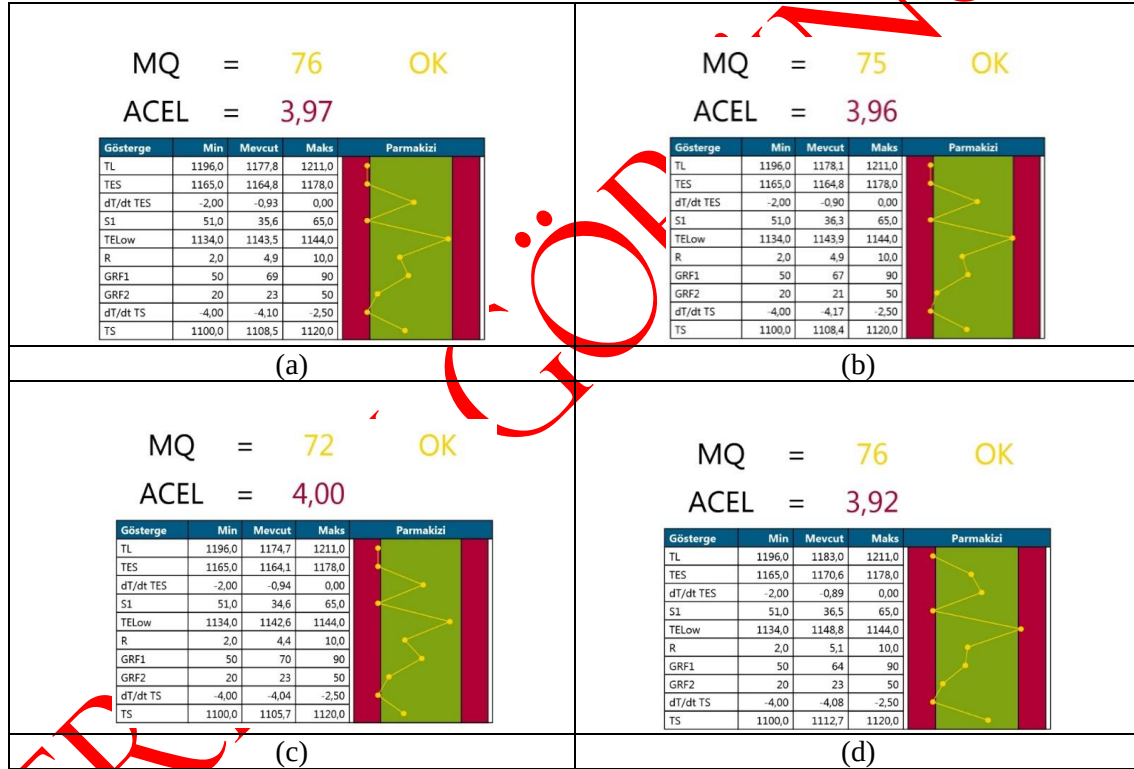
Şekil 8. Döküm sıcaklığının grafit morfolojisi üzerine etkisi (The effect of casting temperature on graphite morphology)

3.2. Termal Analiz ve Katılma Sürecinin

Kontrolü (Thermal Analysis and Control of the Solidification Process)

Numunelerin döküm işleminden önce alınan termal analiz verileri ve aralık değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Tüm numunelerin, metal kalitesi olarak uygun olduğu görülmektedir. Ancak termal analiz işlemlerinde aşılama işlemi, literatür çalışmalarında olduğu gibi termal analiz kabının tabanına yerleştirilerek uygulanmış, bir miktar aşının kap tabanında çözünmeden kaldığı belirlenmiştir. Buna göre ACEL değerinin aşısız numunede 3,97 ve yeşil SiC içeren numunede 3,96, metalürjik SiC içeren numunede 4,00 ve baryum içeren numunede 3,92 olmak üzere birbirine çok yakın olduğu

görülmektedir. Termal grafiklerde görüldüğü üzere, tüm numunelerin TL, S1 ve dT/dt TS parametrelerinin, minimum değer aralığının altında olduğu ve TES değerinin ise, baryum içeren numune hariç, tüm numunelerde minimum değer aralığının çok az altında olduğu gözlenmiştir. Tüm numunelerde R, GRF1, GRF2, TS ve TELow değerlerinin öngörülen aralıklar içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Tüm numunelerde yüksek GRF1 ve düşük GRF2 hem daha iyi grafitleşme hem de daha düşük çekinti riski ile ilişkilendirilmektedir. Bu değerlerin yanında R'nin de aralıkta olması bu sonucu destekler niteliktedir. Bu şekilde katılmanın sonunda daha fazla grafit çekilmesinin meydana gelmesini sağlamaktadır [19].



Şekil 9. a) Aşısız b) Yeşil SiC c) Metalürjik SiC d) Baryum içeren aşı malzemesi kullanılan numunelerin termal analiz verileri, Thermal analysis data for samples a) Uninoculated b) Green SiC c) Metallurgical SiC d) FeSi inoculant containing barium)

3.3. Mikroyapısal İnceleme Sonuçları (Microstructural Examination Results)

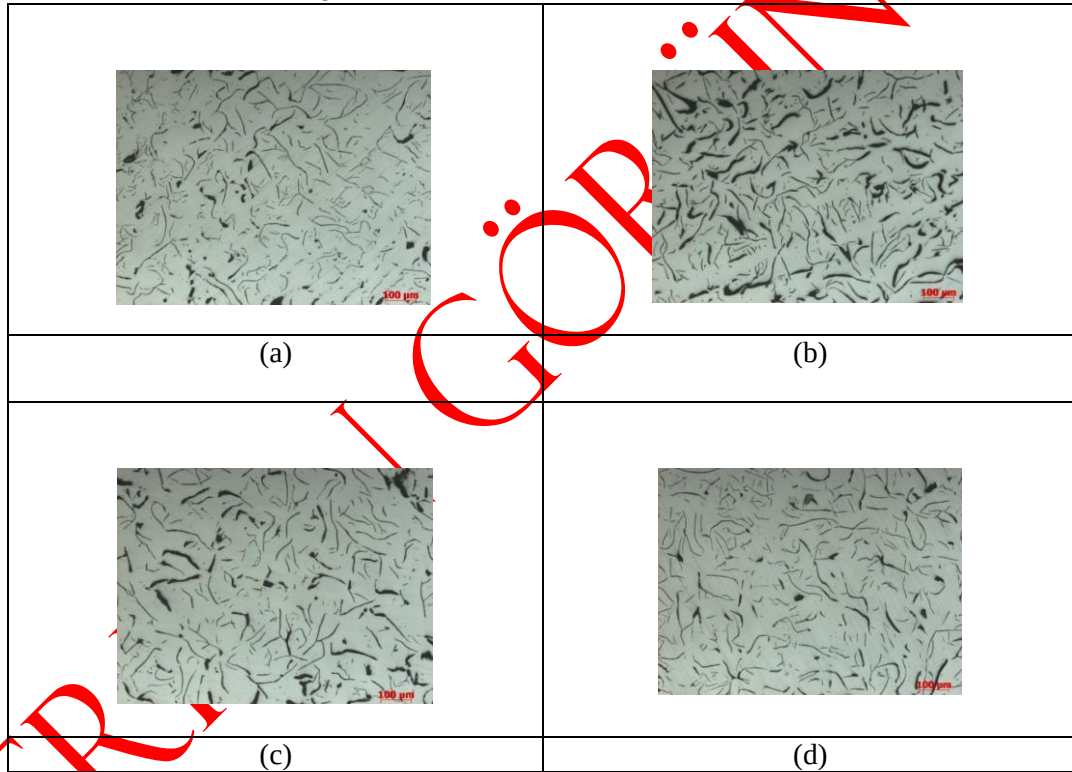
Yapılan döküm işlemi sonucu elde edilen Şekil 10'daki mikroyapı görüntülerinde; aşısız numunede A tipi grafit yapısı düzensiz, ince ve kısa lameller şeklinde dağıldığı lokal olarak D tipi grafitin meydana geldiği gözlenmiştir. Metalürjik SiC ile aşılansız numunede lameller daha kalın, uzun ve

yönlenmiş olarak gözlemlenmiş, A tipi grafit daha belirgin ve homojen bir yapıdadır. Baryum katkılı numunede ise yine A tipi grafit yapısı korunmuş, lameller orta kalınlıkta ve uzunlukta olup, yapıda homojenlik artmış ancak dallanma azalmıştır. Yeşil SiC ile aşılansız numunede lameller oldukça uzun ve kalın olup, grafit yapısı nispeten homojen ve yönlenmiş biçimdedir. Gonzalez vd. tarafından yapılan çalışmalarda ferrosilisyuma kıyasla SiC aşı

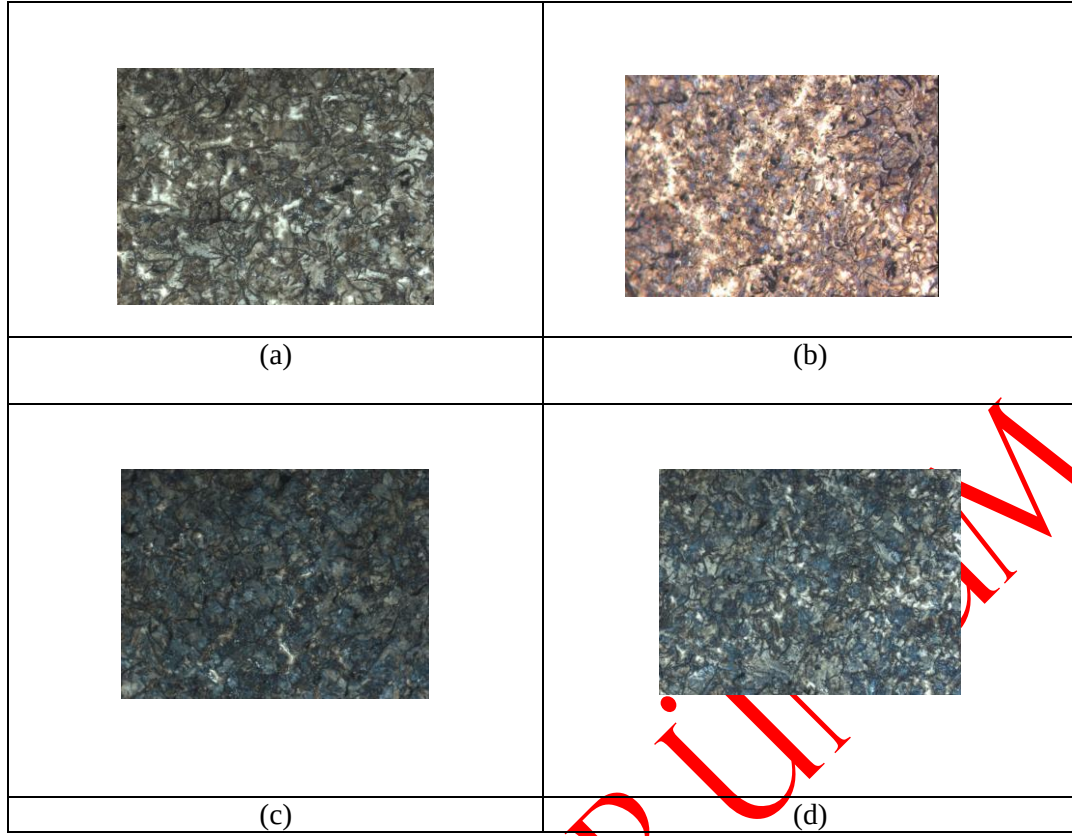
kullanımı ile daha uzun ve kalın grafit lamellerinin oluştuğu, SiC'ün sıvı içerisinde yavaş çözünmesinden dolayı C ve Si'un mikro segregasyonu nedeniyle, bu elementlerin yoğun olduğu bölgelerde yoğun grafitleşmenin meydana gelebileceği, sönümün söz konusu olduğu durumlarda SiC'ün aşı olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir [21]. Ön şartlandırıcı olarak ergitme ocağında ilave edilen SiC ve FeSi aşılardan denendiği Edalatı arkadaşlarının çalışmalarında artan döküm sıcaklığı ile sıvı sıcaklığı TL, ötektik altsoğuma, çil derinliği artarken, ötektik sıcaklığın, ötektik hücre sayısının ve A-Tipi grafit içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. Öte yandan SiC kullanımı ile FeSi aşısı kullanımına göre daha yüksek sıvı sıcaklığı, ötektik sıcaklık, ötektik hücre sayısı ve daha uniform A-Tipi grafit elde edilmiş, çil derinliği azalırken, akıcılık ve sertlik artış göstermiştir [22].

Ana-Marija vd. SiC ile yapılan ön şartlandırıcı olarak ilave edilen %90 içerikli metalürjik SiC malzemenin, çekirdeklenme potansiyelini arttırdığı ve bu etkinin yüksek çelik hurda içeriği kullanıldığında meydana geldiği ifade edilmektedir [8].

Semleit ve arkadaşlarının dökme demirde SiC'ün çözünmesini inceledikleri çalışmalarında, çözünmenin, demirin SiC içerisine difüzyonu ile başladığı, ardından SiC'deki Si ve C'un çözünerek demir-silisyum-karbon çözeltisi sonucu karbonca doymun hale gelen yapının süngerimsi grafit formuna gelerek ve parçalanarak, grafit çekirdeklenmesinde görev yapabileceği, dolayısıyla, çözünmedeki bu gecikme nedeniyle ön şartlandırıcı olarak kullanılmasının gerekçesi açıklanmıştır [40].



Şekil 10. Test edilen numunelerin dağlanmış mikroyapısı a) Aşısız, b) Yeşil SiC, c) Metalürjik SiC, d) Baryum ile aşılanmış. (Etched microstructure of the tested samples: a) Uninoculated, b) Green SiC, c) Metallurgical SiC, d) FeSi inoculant containing barium)

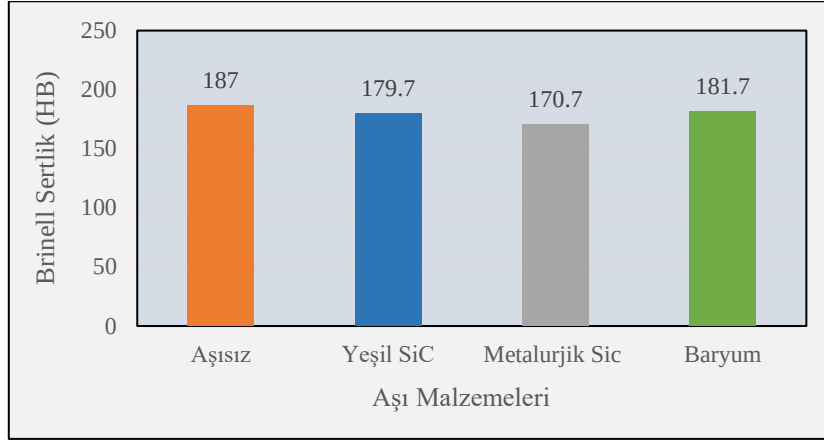


Şekil 11. Test edilen numunelerin mikroyapısı a) Aşısız b) Yeşil SiC c) Metalurjik SiC d) Baryum ile aşılanmış (Microstructure of the tested samples: a) Uninoculated b) Green SiC c) Metallurgical SiC d) FeSi inoculant containing barium)

3.4. Sertlik ve Çekme Testi Sonuçları (Hardness and Tensile Test Results)

Sertlik testi sonuçları Şekil 12’da sunulmuş olup, değerler incelendiğinde, aşısız numunenin 187 HB ile en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Aşılama işlemi, tüm numunelerde sertlik değerlerinde belirli oranlarda azalmaya neden olmuştur. En düşük sertlik değeri 170,7 HB ile metalurjik SiC ile aşılanmış numunede gözlemlenirken, yeşil SiC ve baryum katkılı numunelerde sırasıyla 179,7 HB ve 181,7 HB sertlik

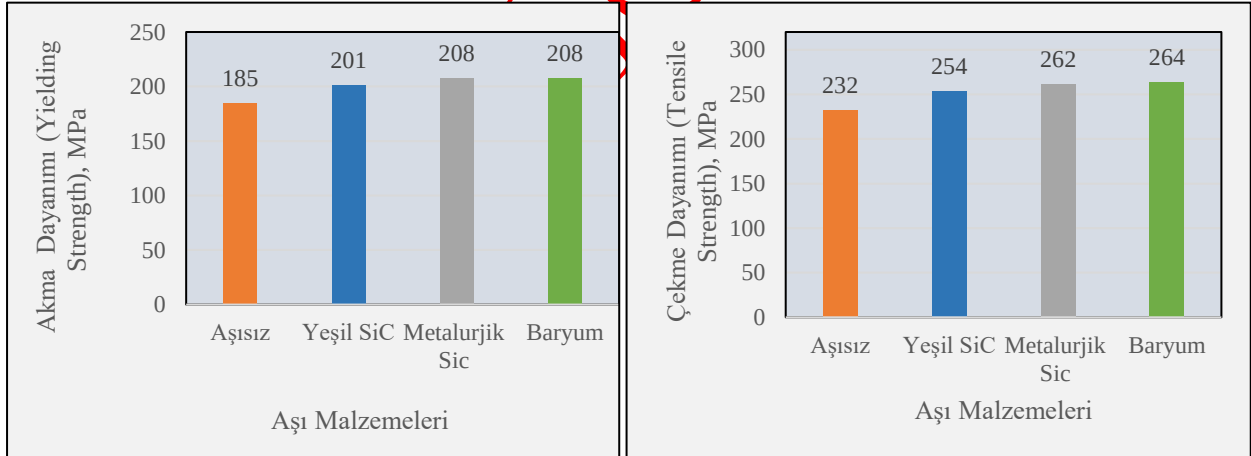
değerleri elde edilmiştir. Buna göre, aşısız numuneye kıyasla metalurjik SiC ile aşılanan numunede %8,7, yeşil SiC ile aşılanan numunede %3,9 ve baryumla aşılanan numunede %2,8 oranında sertlik düşüşü tespit edilmiştir. Öte yandan Gonzalez vd. tarafından yapılan çalışmalarda, SiC aşısı kullanımının, sertliğin azalmasında SiC aşının, ferrosilisyumdan daha fazla olduğunu ve bunun zamana bağlı olarak değişim gösterdiği ifade edilmektedir [21].



Şekil 12. Numunelerin ortalama sertlik değerleri (Average hardness values of the samples)

Çekme testi sonuçları Şekil 13'te verilmiş olup, maksimum çekme ve akma dayanımı değerleri incelendiğinde, aşısız numunenin sırasıyla 232 MPa ve 185 MPa ile en düşük çekme ve akma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Aşılama işlemi, tüm numunelerde mekanik özelliklerde belirgin artışlara neden olmuştur. En yüksek çekme dayanımı 264 MPa ile metalurjik SiC ile aşılama işlemi yapılmış numunede gözlemlenirken, yeşil SiC ve baryum katkı numunelerde sırasıyla 254 MPa ve 262 MPa değerleri elde edilmiştir. Akma dayanımı açısından

ise, metalurjik SiC ve baryum katkıları ile aynı değerde, yeşil SiC ile 201 MPa elde edilmiştir. Buna göre, aşısız numuneye kıyasla çekme dayanımında metalurjik SiC ile %13,8, baryum ile %12,9 ve yeşil SiC ile %9,5 oranında artış; akma dayanımında ise sırasıyla %12,4, %12,4 ve %8,6 oranında artış tespit edilmiştir. Patel vd. tarafından yapılan çalışmada Ba içerikli aşılama kullanımı ile gri ve küresel grafitli dökme demirlerde çekme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir [20].



Şekil 13. Numunelerin maksimum çekme ve akma dayanımı değerleri (Maximum tensile and yield strength values of the specimens)

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gri dökme demir malzemelerde aşılamanın termal analiz ve mekanik özelliklere etkisiyle ilgili yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Gri dökme demirin termal analizi için analiz kabına yerleştirilen aşının etkin çözünmediği tespit edilmiştir.

Uygun sıcaklıkta gerçekleştirilmemesi durumunda, aşılamanın başarılı olmadığı belirlenmiştir.

Aşılama işlemi uygulanmamış lamel grafitli dökme demir malzemenin, yüksek alt soğuma (TES 1130-1140°C) ve yetersiz çekirdeklenme nedeniyle mikroyapısında D tipi grafit oluşumu gerçekleşmiştir.

Sıvı metale uygulanan aşılama işlemi ile A tipi grafit miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Aşılama işlemi ile özellikle Ba içerikli numune başta olmak üzere A tipi grafit yoğunluğunun arttığı ve mikroyapıdaki bu değişime bağlı olarak çekme ile akma dayanımının artış gösterdiği, sertlik değerinde ise aşılama malzeme tipine göre %2,8-9 oranında azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

Her iki SiC aşı ilavesiyle grafitleşme artmış, matris yapısı ferritik hale gelmiştir. Bu nedenle, aşısız numunenin sertlik değeri, aşılı numunelere kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

SiC malzemenin sıvı içerisinde yavaş çözünmesinden dolayı, kalın kesitli ve aşılama sonümünün söz konusu olabileceği döküm parçalarda, özellikle yüksek saflığa sahip yeşil SiC malzemenin aşılama olarak kullanılabileceği potansiyel olarak değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Erkunt Sanayi A.Ş. tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Merve KOPARAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Tarık CEBECİ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Batuhan AKKAYA: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Veyssel DURAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ferhat GÜL: Sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR TARTIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dryden, J. R., & Purdy, G. R. (1989). The effect of graphite on the mechanical properties of cast irons. *Acta Metallurgica*, 37(7), 1999-2006.
- [2] Yakut, R. (2023). Investigation of mechanical properties of grey cast irons reinforced with carbon titanium nitride (TiNC). *Lubricants*, 11(10), 454.
- [3] Ana-Marija, H., Zoran, G., & Anita, S. (2022). Effect of inoculation, cooling rate and charge composition on gray iron microstructure. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations.*, 8(1), 3-6.
- [4] Sahu, S., Bhat, M. N., Kumar, A., Pratik, A., & Kumar, A. (2014). Effect of section thickness on the microstructure and hardness of gray cast iron (a simulation study). *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 3, 35-40.
- [5] Metzger M., Seifert T., (2015) Computational assessment of the microstructure-dependent plasticity of lamellar gray cast iron – Part II: initial yield surfaces and directions, *International Journal of Solids and Structures*, 66, 194-206,
- [6] Demin, D. (2017). Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the "carbon (c)-carbon equivalent (Ceq)" factor space in the range of $c=(3,425-3,563)\%$ and $Ceq=(4,214-4,372)\%$. *Технологический аудит и резервы производства*, 1(1 (33)), 24-32.
- [7] Hecht, R. L., Dinwiddie, R. B. and Wang, H. (1999). Effect of graphite flake morphology on thermal diffusivity of gray cast iron used in automotive brake discs. *Journal of Materials Science*, 34, 4775-4781.
- [8] Álvarez, L., Luis, C. J., & Puertas, I. (2004). Analysis of the influence of chemical composition on the mechanical and metallurgical properties of engine cylinder blocks in grey cast iron. *Journal of materials processing technology*, 153, 1039-1044.
- [9] Thilak, G., Chandramohan, P., Saravanan, V. S., & Nandakumar, B. (2025). Austempering of Directional Control Valves made using Flake Graphite Iron and Compacted Graphite Iron—A Performance Study. *International Journal of Metalcasting*, 1-20.
- [10] Kutelu, B. J., Adubi, E. G., & Seidu, S. O. (2021). Chilling Effect of Inoculation on the Microstructure and Hardness Property of Hypo-

- Eutectic Grey Cast Iron. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 6(2), 72-77.
- [11] Martin, D. R., Moreno, J. R. S., & de Albuquerque Vicente, A. (2015). Effects of different inoculants on the microstructural characteristics of gray cast iron gg-25, hardness and useful life of tools. *Acta Scientiarum. Technology*, 37(4), 355-360.
- [12] Wang, G., Chen, X., Li, Y., & Liu, Z. (2018). Effects of inoculation on the pearlitic gray cast iron with high thermal conductivity and tensile strength. *Materials*, 11(10), 1876.
- [13] Fay, A. (2020). Influence of inoculation on cast iron machinability: Case studies. *China Foundry*, 17(2), 150-157.
- [14] Chisamera, M., Stelian, S. T. A. N., Riposan, I., Stefan, E., Costache, G. (2008). Thermal analysis of inoculated grey cast irons. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 31(2), 11-16.
- [15] Riposan, I., Chisamera, M., Stan, S., Skaland, T. (2003). Graphite nucleant (microinclusion) characterization in Ca/Sr inoculated grey irons. *International Journal of Cast Metals Research*, 16(1-3), 105-111.
- [16] Riposan, I., Stan, S., Uta, V., Stefan, I. (2017). Cast iron inoculation enhanced by supplementary oxy-sulfides forming elements. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(9), 4217-4226.
- [17] Stefan, E., Chisamera, M., Riposan, I., Stan, S. (2021). Graphite nucleation sites in commercial grey cast irons. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4091-4095.
- [18] Riposan, I., Chisamera, M., Stan, S., White, D. (2009). Complex (Mn, X) S compounds-major sites for graphite nucleation in grey cast iron. *China Foundry*, 6(4), 352-358.
- [19] Stefan, E., Riposan, I., Chisamera, M., Stan, S. (2020). Lanthanum role in the graphite formation in gray cast irons. *Minerals*, 10(12), 1146.
- [20] Patel, D., Nanavati, P., Chug, C. (2013). Effect of Ca and Ba Containing Ferrosilicon Inoculants on Microstructure and Tensile Properties of IS-210, and IS-1862 Cast Irons. In *Proceedings of the National Conference on Emerging Trends in Engineering Technology & Management*, Ahmedabad, Gujarat, India, 1-8.
- [21] González H.C., Espitia P.P., Sierra R.A., (2017) Fading and graphite nucleation sites in grey iron inoculated using silicon carbide, *R. revista Matéria*, 22 (2).
- [22] Edalati K., Akhlaghi F., Nili-Ahmadabadi M. (2005). Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2), 183-187.
- [23] Aydoğuş A., Acarer M. (2019). Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılabilirlik Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 18(3), 199-208.
- [24] Stefanescu D. M., Suarez R., Kim S. B. (2020). 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron. *China Foundry*, 17(2), 69-84.
- [25] Muhmond H. M. (2014). On the inoculation and graphite morphologies of cast iron (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- [26] Metal Casting Institute. (n.d.). Iron types. Retrieved April 20, 2025. <https://metalcastinginstitute.com/iron-types/>
- [27] Stefanescu Doru. (2015). *Science and Engineering of Casting Solidification Third Edition*. 10.1007/978-3-319-15693-4.
- [28] Riposan I., Lefter C. – Inoculation of Cast Iron: Principles and Practices, *AFS Casting Conference 2012*
- [29] Koch M., Soulas, K. (2014). Inoculation of grey and ductile iron. 7th International Foundry Congress, Ankiros Fairs, 11–13 Eylül 2014, İstanbul, Türkiye. https://akademi.tudoksad.org.tr/site/file?u=20181123070549_congress_file_143.pdf&t=Inoculation+of+Grey+and+Ductile+Iron
- [30] Dorula, J., Kopyciński, D., Guzik, E., & Szczesny, A. (2022). Procedure of Eliminating Porosity in Grey Cast Iron with Low Sulphur Content. *Materials*, 15(18), 6273.
- [31] Janerka, K., Kostrzewski, Ł., Stawarz, M., Jezierski, J., & Szajnar, J. (2022). Various aspects of application of silicon carbide in the process of cast iron Melting. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67.
- [32] Xue, W., & Li, Y. (2016). Pretreatments of gray cast iron with different inoculants. *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 408-415.
- [33] Omranian, P., Shakeri, N., Mohamemadpour, A., Khailpour, M., & Alavi, N. (2013). Use of silicon carbide as an inoculant in ductile iron casting to reduce the cost with keeping the properties. *Metal Journal*, 15(5), 1-5.
- [34] Persson, P. E., Udriou, A., Vomacka, P., Xiaojing, W., & Sjögren, T. (2010). ATAS® as a tool for analyzing, stabilizing and optimizing the graphite precipitation in grey cast iron. In *Proceedings of the 69th World Foundry Congress*, Hangzhou, China 1-16.

- [35] V. Fourlakidis, J. Ekengård and A. Diószegi (2010) Non-metallic inclusions in lamellar graphite iron 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron. https://www.researchgate.net/publication/281406663_Nonmetallic_Inclusions_in_Lamellar_Graphite_Iron
- [36] Stefanescu, D. M. (2002). Science and Engineering of Casting Solidification. Springer.
- [37] Loper, C. R., & Gundlach, R. B. (1991). Inoculation of Cast Irons. AFS Transactions, 99, 407–416.
- [38] Lacaze, J., & Sertucha, J. (2015). On the fading of inoculation effect in cast irons, Materials Science and Engineering: A, 645, 212–219.
- [39] Elliott, R. (1988). Cast Iron Technology. Butterworth-Heinemann.
- [40] Tim Semleit, Ida Adhiwiguna, Jasen Wijaya, Rüdiger Deike, Duisburg (2021) Investigation of silicon carbide dissolution behavior in molten cast iron under specific consideration of the formation of reaction layers, Giesserei Special, 1, 46 – 53.

ERKEN GÖRÜNMÜ